

Sistemas de fallas tardi-oroclinal Cantábrico: modelación de su influencia en la evolución alpina de Iberia

Late-Cantabrian orocline fault systems: modelling of their influence in the Iberian alpine evolution

J. Fernández-Lozano¹, G. Gutiérrez-Alonso^{1,2}, D. Sokoutis³, E. Willingshofer³, G. De Vicente⁴ y S. Cloetingh³

1 Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca (37008 Salamanca, España). jfl@usal.es

2 Geology and Geography Department, Tomsk State University, (Tomsk 634050, Federación Rusa).

3 Department of Earth Sciences, Utrecht University. (3584 CD, Utrecht). Holanda

4 Instituto de Geociencias. Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid (28040) Madrid. España

Resumen: La península ibérica constituye un laboratorio natural para el conocimiento de la deformación intraplaca alpina. Aunque la actual topografía es el resultado de los últimos eventos tectónicos ocurridos entre el Eoceno y el Mioceno inferior, la evolución de la fracturación que lo acompaña no es del todo bien conocida. Hasta ahora, la denominación tardi-varisco ofrecía una ventana temporal donde quedaban incluidos procesos tectónicos escasamente definidos. Presentamos una serie de modelos litosféricos en los que se investiga el control que ejercen estructuras posteriores al desarrollo del orógeno Varisco, en las postrimerías de la formación del oroclinal Cantábrico (Arco Ibero Armoricano, 310-295 Ma), y su evolución posterior durante gran parte del ciclo alpino. La superficie de los modelos es analizada mediante el estudio de velocimetría de partículas que permite establecer el análisis de la deformación y la cinemática de las estructuras producidas durante todo el proceso de deformación. Los resultados indican que la configuración actual de la topografía se ve fuertemente controlada por la presencia de las fallas producidas en los estadios finales de la formación del oroclinal y fueron posteriormente reactivadas durante el ciclo alpino. Estas estructuras son responsables del levantamiento topográfico que da lugar a la configuración de cadenas intraplaca y cuencas asociadas durante el acortamiento pirenaico.

Palabras clave: oroclinal Cantábrico, alpino, deformación intraplaca, Iberia.

Abstract: Iberia provides a natural laboratory for documentation of intraplate alpine deformation. Although present-day topography is the result of the latest tectonic events occurred during the Eocene and Lower Miocene, the former evolution of related structures is not well documented. Hitherto, the late-Variscan term offered a vague and wide temporal window, where most of the tectonic processes not well understood were included. We present an analogue modelling study where the control and alpine evolution of structures postdating the Variscan orogeny, originated during the formation of the Cantabrian Orocline (Ibero-Armorican Arc, 310-295 Ma), is investigated. The models surface was analyzed through the particle image velocimetry method, which provides useful information about the evolution and kinematics of structures developed during deformation. The results show that the present-day configuration of topography is strongly controlled by the presence of faults formed during the final stages of the orocline development and were subsequently reactivated during the Alpine cycle. These structures are responsible for topographic uplift leading to the evolution of intraplate reliefs and associated basins during the Pyrenean shortening.

Keywords: Cantabrian orocline, Alpine, intraplate mountain building, Iberia.

INTRODUCCIÓN

La deformación intraplaca alpina en la península ibérica ha sido explicada en términos de plegamiento litosférico, de la acción combinada de procesos orogénicos y extensionales o de la formación de despegues corticales, entre otros (Cloetingh et al., 2002; Verges y Fernández, 2006; Fernández-Lozano et al., 2012; Quintana et al., 2015). Sin embargo, su relación con las fallas tardi-oroclinales no había sido propuesto hasta el momento.

Los estadios finales de la formación del oroclinal Cantábrico (310-299 Ma) conllevó la curvatura de la estructura lineal N-S (en coordenadas actuales) del cinturón Varisco (Gutiérrez-Alonso et al., 2004) y son

los responsables de la generación de dos sistemas conjugados de fracturas orientados NO-SE y NE-SO (en coordenadas actuales). Posteriormente, durante el Mesozoico, en el nordeste de Iberia se desarrollaron una serie de cuencas extensionales durante el adelgazamiento cortical, dando lugar a depocentros de dirección E-O (en coordenadas actuales). La extensión no avanzó hacia el macizo ibérico, que se mantuvo estable mientras se configuraban las cuencas mesozoicas orientales.

El acortamiento Alpino, ocurrido entre el Eoceno y el Oligoceno, produjo la inversión tectónica de las cuencas mesozoicas y la reactivación de los sistemas conjugados tardi-oroclinales. Estas estructuras, podrían

haber tenido una influencia mucho mayor de lo hasta ahora reconocida.

Partiendo de la relevancia de estas estructuras en la evolución del proceso alpino, presentamos una serie de modelos analógicos en los que se analiza la cinemática alpina de estas estructuras y su evolución durante la deformación mediante el análisis de partículas en superficie. Estas estructuras parecen ser los principales condicionantes del relieve actual intraplaca.

MARCO GEOLÓGICO

El oroclinal Cantábrico representa un orógeno curvado de más de 3.000 km de longitud originado durante el Carbonífero superior (ca. 310-299 Ma). El patrón de fracturación que afecta a la parte occidental del continente europeo (principalmente Francia e Iberia) coincide con la geometría de este arco, producto de la curvatura de 180° de un orógeno inicialmente lineal con disposición N-S (en coordenadas ibéricas actuales) (Gutiérrez-Alonso et al. 2012; Weil et al., 2013). Como resultado del reapretamiento del oroclinal Cantábrico en sus últimos estadios, se produjeron una serie de fallas conjugadas que acomodaron el acortamiento N-S. Coetáneamente se produjo un reemplazamiento en el manto litosférico (Gutiérrez-Alonso et al., 2011). Tanto la presencia de las nuevas fallas, como las variaciones litosféricas E-O condicionaron la extensión y el desarrollo de las cuencas pérmicas y mesozoicas posteriores. La apertura simultánea de las cuencas mesozoicas de la zona Vasco-Cantábrica, Cameros e Ibérica (con historia tectónica y sedimentaria similar), coetáneas con la apertura del golfo de Vizcaya, produjo fragmentación y adelgazamiento cortical, seguido por un proceso de subsidencia térmica. La presencia de fallas E-O normales a la dirección de extensión de estas cuencas facilitó la acumulación de hasta más de 5.000 m de sedimentos jurásicos y cretácicos (Salas y Casas 1993, Suárez-González, 2015).

La distinta evolución durante la génesis del oroclinal Cantábrico y de las cuencas mesozoicas hace que el estado tectono-termal de la litosfera ibérica varíe significativamente de Este a Oeste (Torné et al., 2015). En el este, la presencia de una anomalía térmica sería debida al desarrollo de cuencas mesozoicas como resultado de la extensión y adelgazamiento cortical, mientras que la zona occidental de la península, donde no se generaron cuencas mesozoicas, la litosfera se mantendría sin apenas cambios desde la culminación del oroclinal Cantábrico.

Estas diferencias en la litosfera podrían haber jugado un papel importante en el comportamiento reológico de la misma al inicio del ciclo alpino (Fernández-Lozano et al., 2012) por lo que han sido incluidas en la modelación que se presenta.

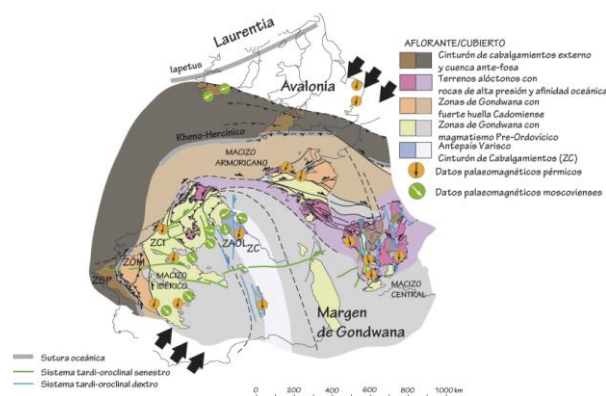


FIGURA 1. Oroclinal Cantábrico en el Pérmico en el que se muestran los datos paleomagnéticos existentes que constriñen la cinemática del mismo (ver Weil et al., 2013). Se muestran los sistemas conjugados de fallas interpretados como tardi-oroclinales.

MODELACIÓN LITOSFÉRICA

Presentamos dos modelos litosféricos compuestos por tres capas: corteza superior, inferior y manto litosférico (Fig.2). Los modelos fueron deformados al 20% de volumen de acortamiento de acuerdo a los datos aportados para el centro de la península ibérica por De Vicente et al. (1996). El modelo-I es el más sencillo y permite conocer la evolución con un único sistema de fracturas, mientras que el modelo-II incorpora varios sistemas y la presencia de los granitos del Sistema Central. Estas discontinuidades representan los sistemas de fractura principales relacionados con los estadios finales del reapretamiento oroclinal y la apertura de cuencas mesozoicas: NO-SE, NE-SO y E-O, respectivamente. Su representación en los modelos se establece mediante bandas de silicona que facilitan la localización de la deformación y su reactivación. Los aspectos relacionados con el escalado pueden consultarse en Fernández-Lozano et al. (2012).

Para conocer la evolución de las estructuras relacionadas con la reactivación de las fracturas en superficie se utilizó la tecnología de análisis cinemático de partículas establecido por Leever et al. (2011). Este método consiste en la comparación de los píxeles de imágenes sucesivas, calculando las magnitudes de desplazamiento por comparación de la posición de un punto inicial conocido a un estado posterior durante la deformación del modelo.

RESULTADOS

La evolución en superficie de las estructuras generadas en los experimentos muestra variaciones cinemáticas significativas a lo largo del proceso de deformación. Aunque la reactivación de estructuras pre-existentes se hace efectiva en el inicio del acortamiento de los modelos, se pueden observar distintas fases de reactivación y variaciones en los regímenes tectónicos a lo largo de todo el experimento

(Fig.3). Las magnitudes de desplazamiento también muestran variaciones significativas. Así, las zonas próximas a la pared de empuje y la presencia de estructuras previas son las que mayor tasa de desplazamiento alcanzan. Además, los vectores obtenidos indican una rotación controlada por la cinemática de cada zona de debilidad, estableciéndose tres dominios: i) dominio-I caracterizado por vectores paralelos a la dirección de acortamiento; ii) dominio-II con sentido horario de desplazamiento y iii) dominio-III constituido por vectores que presentan un giro anti-horario (Fig. 3). Los vectores desplazamiento muestran la cinemática de las fallas activas.

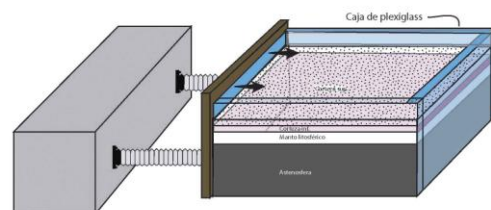
De los resultados de los modelos, se desprende que las fallas con dirección NE-SO experimentan un movimiento de desgarre sinestro con rotación de los vectores desplazamiento en sentido horario a un lado y anti-horario al otro. De igual forma, aquellas con dirección NO-SE se presentan como estructuras de desgarre con movimientos dextros y una rotación inversa de los vectores (Fig.3). Las zonas de debilidad de dirección E-O mantienen un régimen de compresión caracterizado por la formación de cabalgamientos. Los modelos digitales obtenidos proporcionan información de la evolución que sufren las zonas de debilidad (Fig.3): los mayores relieves se encuentran a lo largo de estas estructuras.

DISCUSIÓN

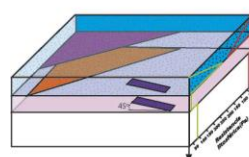
La actividad tectónica tardi-oroclinal en la península ibérica representa uno de fenómenos geológicos peor conocidos y poco estudiados. Debido a la escasez de sedimentos preservados en cuencas pérmicas y estructuras relictas, el análisis evolutivo de la fracturación desarrollada durante los últimos estadios del oroclinal Cantábrico resulta complejo. Además, la presencia de fuertes contrastes en las condiciones reológicas de la litosfera, originados durante el propio proceso de plegamiento oroclinal y por los procesos extensionales mesozoicos, podría enmascarar los procesos que han operado a escala cortical posteriormente. Los modelos litosféricos arrojan luz sobre los mecanismos involucrados en la formación del relieve alpino intraplaca de Iberia. La presencia de una fracturación previa originada en la fase de reapretamiento del oroclinal Cantábrico, junto a la apertura de las cuencas mesozoicas del norte y este peninsular dio lugar a una compleja red de relieves intraplaca durante el acortamiento e inversión tectónica ocurrida en el Terciario. Las diferencias termo-mecánicas heredadas afectaron a la litosfera ibérica durante el Alpino y podrían haber condicionado la distinta evolución de estas estructuras, produciendo levantamientos diferenciales y bajo diferentes regímenes tectónicos (i.e. transpresión, compresión pura, etc.), dando lugar a la partición de la deformación

y el levantamiento del relieve durante distintos estadios de actividad.

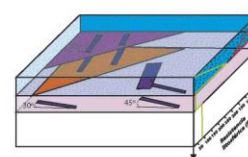
a) Modelo analógico



b) Modelo-I



c) Modelo-II



LEYENDA:			
Litosfera Ibérica	Arena de feldespato	Esesor (cm)	Densidad (kg/m ³)
	Silicona-1	1 cm	1330
	Silicona-2	1 cm	1532
Litosfera Mesozoica	Silicona-3	2 cm	1590
	Arena de feldespato	1 cm	1330
	Silicona-4	1 cm	1486
	Silicona-5	2 cm	1606
	Silicona-5	1532	1.24 E+4

FIGURA 2. Estructura de los modelos litosféricos. A) Modelo-I donde se representan las variaciones termo-mecánicas de la litosfera afectada por extensión mesozoica en el este peninsular (silicona 3 y 4) y la litosfera del macizo Ibérico (silicona 1 y 2). B) La misma configuración que en (A), pero con la presencia de zonas de debilidad con diferentes ángulos representando fracturas tardi-oroclinales y mesozoicas.

El modelo de evolución propuesto explica la presencia de una fracturación heredada y coherente con la geometría del oroclinal Cantábrico. Por tanto, la topografía actual podría estar condicionada por las mencionadas estructuras durante un proceso de reactivación episódico de larga duración.

CONCLUSIONES

Los modelos presentados indican que la topografía actual de la península ibérica puede ser el resultado combinado de las variaciones termo-mecánicas presentes en la litosfera y de la reactivación alpina de: i) sistemas conjugados de fractura originados durante los últimos estadios de evolución del oroclinal Cantábrico de orientación NE-SO y NO-SE; y ii) las estructuras E-O relacionadas con la formación de las cuencas mesozoicas Vasco-Cantábrica e Iberia. Estas estructuras podrían haber sufrido una historia evolutiva compleja, caracterizada por reactivaciones múltiples bajo diferentes regímenes tectónicos.

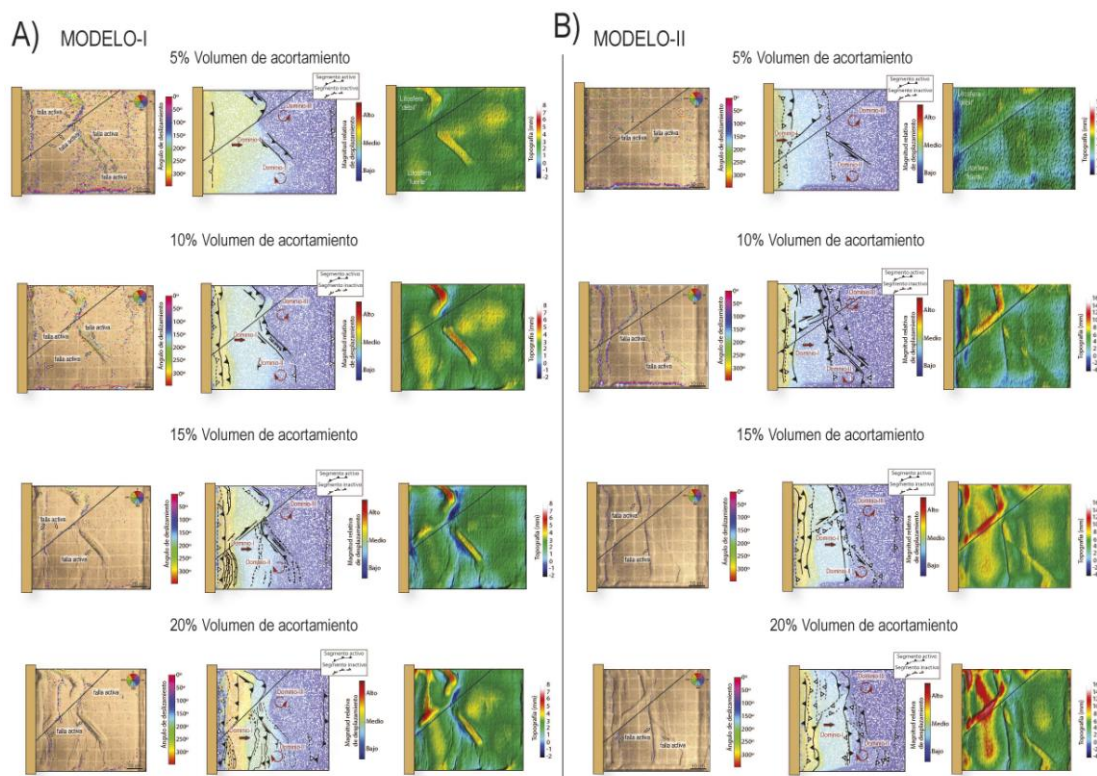


FIGURA 3. Análisis de la superficie de los modelos durante cuatro estadios de deformación (acortamiento horizontal desde la izquierda). De izquierda a derecha: ángulo de deslizamiento que indica el sentido de desplazamiento de la falla (morado en compresión, verde y amarillo desgarre); Magnitud de desplazamiento y dominio de vectores desplazamiento (I-horizontal, II-horario y III-antihorario); modelo digital del relieve generado en el que se observan los sucesivos levantamientos (rojo) asociados en muchos casos a las fallas pre-existentes. A) Modelo-I y B) Modelo-II.

REFERENCIAS

- Cloetingh, S. A. P. L., Burov, E., Beekman, F., Andeweg, B., Andriessen, P. A. M., Garcia-Castellanos, D., De Vicente, G. y Vegas, R. (2002): Lithospheric folding in Iberia. *Tectonics*, 21(5): 1-26.
- De Vicente, G., Giner, J. L., Muñoz-Martín, A., González-Casado, J. M., y Lindo, R. (1996): Determination of present-day stress tensor and neotectonic interval in the Spanish Central System and Madrid Basin, central Spain. *Tectonophysics*, 266(1): 405-424.
- Leever, K. A., Gabrielsen, R. H., Sokoutis, D., y Willingshofer, E. (2011): The effect of convergence angle on the kinematic evolution of strain partitioning in transpressional brittle wedges: Insight from analog modeling and high-resolution digital image analysis. *Tectonics*, 30(2): 1-25.
- Fernández-Lozano, J., Sokoutis, D., Willingshofer, E., Dombrádi, E., Martín, A. M., De Vicente, G., y Cloetingh, S., (2012): Integrated gravity and topography analysis in analog models: Intraplate deformation in Iberia. *Tectonics*, 31(6): 1-9.
- Gutiérrez-Alonso, G., Johnston, S. T., Weil, A. B., Pastor-Galán, D., y Fernández-Suárez, J. (2012): Buckling an orogen: the Cantabrian Orocline. *GSA Today*, 22(7): 4-9.
- Salas, R., y Casas, A. (1993): Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin. *Tectonophysics*, 228(1-2): 33-55.
- Suárez-González, P. (2015): Sedimentología y paleogeografía de los sistemas de humedales costeros de la Fm Leza (Cretácico Inferior, Cuenca de Cameros): Implicaciones en el origen y desarrollo de los depósitos microbianos asociados, Tesis Doctoral, UCM, Madrid, 363 pp.
- Torne, M., Fernández, M., Vergés, J., Ayala, C., Salas, M. C., Jimenez-Munt, I., Buffet, G., y Díaz, J. (2015): Crust and mantle lithospheric structure of the Iberian Peninsula deduced from potential field modeling and thermal analysis. *Tectonophysics*, 663: 419-433.
- Vergés, J., y Fernández, M. (2006): Ranges and basins in the Iberian Peninsula: their contribution to the present topography. *Geological Society, London, Memoirs*, 32(1): 223-234.
- Weil, A. B., Gutiérrez-Alonso, G., Johnston, S. T., y Pastor-Galán, D. (2013): Kinematic constraints on buckling a lithospheric-scale orocline along the northern margin of Gondwana: a geologic synthesis. *Tectonophysics*, 582: 25-49.